
FABRIKASI MIKROSFIR UO_2 MENGGUNAKAN TEKNIK AERASI

Meniek Rachmawati, Etty Mutiara, Tri Yulianto

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: emutiara@batan.go.id

(Naskah diterima : 18-04-2016, Naskah direvisi: 11-05-2016, Naskah disetujui: 20-05-2016)

ABSTRAK

FABRIKASI MIKROSFIR UO_2 MENGGUNAKAN TEKNIK AERASI. Telah dikembangkan proses fabrikasi mikrosfir UO_2 berdensitas rendah untuk umpan langsung proses peletisasi bahan bakar reaktor *PHWR* maju. Fabrikasi mikrosfir UO_2 berdensitas rendah dilakukan dengan cara sol-gel menggunakan teknik aerasi pada sol/*broth* dengan metode eksternal dan tiga variasi cara gelasi. Pada teknik aerasi, *broth* disiapkan langsung digelasi tanpa didiamkan selama satu malam. Teknik aerasi merupakan kebalikan dari teknik deaerasi yang digunakan pada fabrikasi mikrosfir bahan bakar HTGR. *Broth* yang telah disiapkan dengan perbandingan mol NO_3^-/U antara 1,5 hingga 1,7 dengan pH larutan 1,6 dan viskositas antara 630-660cP langsung digelasi dengan tiga cara gelasi. Proses gelasi cara 1 dan cara 2 dilakukan dengan melewati *broth* pada *dispersion nozzle* berdiameter 1mm yang digetarkan dengan *electromagnetic vibrator* pada 150 Hz dengan media untuk droplet jatuh bebas yang berbeda sebelum masuk ke dalam larutan NH_4OH , sedangkan gelasi dengan cara 3 dilakukan secara manual. Mikrosfir UO_2 basah yang diperoleh dari ketiga cara gelasi di atas mendapat perlakuan panas yang sama yaitu dikeringkan pada temperatur 85 °C dan 220 °C masing-masing selama selama 1jam, dilanjutkan dengan proses kalsinasi mikrosfir UO_2 selama 1 jam pada temperatur 500 °C dalam media gas O_2 dan direduksi pada temperatur 600 °C dalam media campuran gas N_2 dan H_2 selama 1 jam. Mikrosfir UO_2 hasil gelasi dengan cara 3 dipilih untuk disortir dan dikarakterisasi. Hasil karakterisasi memberikan data karakteristik mikrosfir UO_2 berupa data diameter mikrosfir sebesar 900 μm , *tap density* 1,90 g/cm^3 dan luas muka spesifik sebesar 6 m^2/g . Hasil analisis dan hasil karakterisasi kemudian dibandingkan dengan data penelitian lain sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan teknik aerasi pada *broth* menghasilkan mikrosfir UO_2 berdensitas rendah yang memenuhi kriteria sebagai umpan langsung proses peletisasi bahan bakar *PHWR* maju dan *PWR* maju. Fabrikasi menggunakan teknik aerasi dengan gelasi cara 2 mempunyai peluang yang paling besar untuk menghasilkan mikrosfir UO_2 dengan laju produksi yang tinggi dan karakteristik tertentu jika dilakukan pengaturan ulang pada laju dispersi dan durasi *droplet* jatuh bebas.

Kata kunci: UO_2 , bahan bakar, sol-gel, mikrosfir, aerasi.

ABSTRACT

UO₂ MICROSPHERE FABRICATION USING AERATION TECHNIQUE. It has been developed a fabrication process of low density UO₂ microspheres for direct feed in pelletization process of PHWR advanced reactor fuel. The fabrication has been implemented by a sol-gel method using aeration technique on the sol / broth with external methods and three variations of gelation. In the aeration technique, broth is directly prepared in gelation mode without one night settling time. The aeration technique is the opposite of the deaeration technique, which is used in fabricating microspheres HTGR fuel. The broth which has been prepared with a mole ratio of NO₃ / U between 1.5 to 1.7 with pH solution of 1.6 and viscosity between 630-660 cP directly to be gelated in three ways of gelation. The process of both gelation method 1 and method 2 is implemented by passing through the broth to a dispersion nozzle with 1 mm of diameter which is vibrated by an electromagnetic vibrator at 150 Hz with medium for free fall droplet differently before entering into a solution of NH₄OH, while the gelation method 3 implemented manually. The wet UO₂ microspheres derived from the three ways of gelation above are treated by heating process at the same way that is dried at a temperature of 85 °C and 220 °C each respectively for 1 hour, followed by a calcination process of microspheres UO₂ for 1 hour at a temperature of 500 °C in gaseous medium of O₂ and a reduction process at a temperature of 600 °C in gaseous mixture of N₂ and H₂ medium for 1 hour. The UO₂ microspheres gelation of method 3 are chosen to be sorted and characterized. The characterization results provide the characteristics data of UO₂ microspheres in the form of microspheres diameter of 900 µm, tap density of 1.90 g/cm³ and specific surface area of 6 m²/g. The results of the analysis and characterization are then compared to other data of other research so that it can be concluded that the use of such an aeration technique on the broth can produce low density UO₂ microspheres that qualify as direct feed for fuel pelletization process of the advanced PHWR and advanced PWR. The fabrication using the aeration technique with gelation method 2 has the greatest opportunity to produce UO₂ microspheres with a high production rate and certain characteristics if it is implemented by resetting the rate of dispersion and the free fall droplet duration.

Keywords: UO₂ , fuel, sol-gel, microsphere, aeration.

PENDAHULUAN

Bahan bakar reaktor generasi IV terus dikembangkan dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja dan *inherent safety* (keselamatan melekat) bila dibandingkan dengan bahan bakar reaktor konvensional saat ini^[1-5]. Pada reaktor HTGR (*High Temperature Gas-cooled Reactor*) sebagai salah satu reaktor generasi IV, bahan bakar yang digunakan adalah mikrosfir TRISO dengan pengkayaan uranium lebih kurang 17%^[2-7]. Mikrosfir TRISO sebagai bahan bakar HTGR difabrikasi dengan memenuhi persyaratan keselamatan tertentu agar tetap handal dan mampu mengungkung hasil fisi sampai *burn up* yang diinginkan tercapai dan bahkan sampai bahan bakar ini dilimbahkan^[2-7]. Lapisan TRISO pada bahan bakar merupakan salah satu *barrier* yang mempunyai kontribusi utama terhadap *inherent passive safety* (keselamatan melekat) dalam pengoperasian reaktor HTGR^[2-5]. Setelah mengalami proses iradiasi di reaktor HTGR, lapisan TRISO akan bertindak sebagai *chamber* pengungkung produk hasil fisi baik pada operasi normal, kondisi kecelakaan maupun pada saat dilimbahkan^[2-5].

Mikrosfir TRISO untuk reaktor HTGR dibuat dari campuran beberapa oksida (MOX) dan karbida yang difabrikasi melalui proses sol-gel^[3-12]. Melalui proses sol-gel dihasilkan mikrosfir UO_2 berdensitas tinggi dengan dimensi tertentu yang memiliki homogenitas mikro (*micro-homogeneity*) yang tinggi^[5-7,13-14]. Homogenitas mikro yang tinggi pada mikrosfir TRISO diperlukan untuk mengakomodasi *swelling*^[15] dan pengungkungan hasil fisi dengan kondisi selamat^[2-5]. Mikrosfir UO_2 yang belum diproses menjadi mikrosfir TRISO dan merupakan hasil fabrikasi *front end* (ujung depan) bahan bakar HTGR, dapat digunakan sebagai pengganti serbuk UO_2 untuk umpan langsung proses peletisasi bahan bakar PHWR maju (*Advanced Pressurized Heavy Water Reactor*) dan PWR maju

(*Advanced Pressurized Water Reactor*). Mikrosfir UO_2 hasil fabrikasi proses sol-gel digunakan pada proses peletisasi untuk mendapatkan pelet sinter dengan homogenitas mikro yang tinggi. Homogenitas tersebut akan diperoleh terutama pada saat menggunakan umpan peletisasi berupa campuran UO_2 dengan bahan aditif/*dopant* atau dengan oksida lainnya (MOX)^[5-6,14,16-20]. Pelet UO_2 dengan derajat homogenitas mikro yang tinggi akan mempunyai komposisi relatif sama di setiap bagian pelet sehingga dapat mengakomodasi *swelling* pada waktu diiradiasi dengan *discharged burn-up* yang tinggi di reaktor pengguna^[18].

Mikrosfir UO_2 mempunyai kesferisan (*sphericity*) yang tinggi dan bersifat *free flowing*^[5-6,13-14,16-21]. Bahan bakar UO_2 dengan kesferisan yang tinggi maka kompaksi mikrosfir tidak membutuhkan proses penggranulasian^[14,16-20] sehingga dapat memperpendek alur dan durasi proses peletisasi. Selain itu, sifat *free flowing* pada mikrosfir akan membantu mengurangi friksi antar permukaan mikrosfir pada waktu dikompaksi dan meningkatkan kemampuan pengepakan. Dengan demikian proses kompaksi mikrosfir UO_2 tidak membutuhkan pelumas padat untuk memperoleh pelet mentah UO_2 dengan densitas yang tinggi. Fungsi pelumas padat pada proses kompaksi dapat diakomodasi oleh sifat *free flowing* mikrosfir. Disamping itu mikrosfir UO_2 dapat difabrikasi dengan berbagai ukuran^[5-7]. Penggunaan mikrosfir UO_2 yang berukuran lebih besar dari serbuk^[5-7], tidak menimbulkan debu selama proses kompaksi sehingga tidak dibutuhkan pengungkungan untuk melindungi pekerja dari bahaya debu radioaktif yang ditimbulkan^[14,16-22].

Mikrosfir UO_2 yang akan dimanfaatkan sebagai umpan langsung proses peletisasi bahan bakar PHWR maju atau PWR maju mempunyai spesifikasi yang berbeda dari mikrosfir untuk bahan bakar HTGR^[10-12,14]. Bahan bakar HTGR berupa mikrosfir TRISO yang keras dan padat,

sementara mikrosfir UO_2 untuk umpan langsung proses peletisasi bahan bakar PWHR sebagai pengganti serbuk UO_2 adalah mikrosfir yang berdensitas rendah/lunak (*less-dense/soft*)^[14,16-18]. Dengan karakteristik demikian, proses kompaksi mikrosfir UO_2 akan memberikan densitas kompakan yang tinggi^[14,16-20]. Mikrosfir UO_2 yang keras dan berdensitas tinggi (non-porus) sebagaimana yang dipersyaratkan pada bahan bakar HTGR akan menurunkan interlok mekanik (*mechanical interlock*) antar mikrosfir sehingga densitas pelet mentah yang diperoleh pada proses kompaksi pelet UO_2 PWHR maju menjadi lebih rendah^[23]. Salah satu parameter proses sol-gel yang dapat digunakan untuk mendapatkan mikrosfir UO_2 dengan densitas rendah adalah teknik aerasi. Teknik aerasi adalah proses yang dilakukan agar diperoleh mikrosfir UO_2 dengan karakteristik tertentu sehingga berdensitas rendah dan merupakan kebalikan dari teknik deaerasi yang digunakan pada fabrikasi mikrosfir bahan bakar HTGR^[9]. Pada teknik aerasi, sol/*broth* yang disiapkan langsung digelasi tanpa didiamkan selama satu malam. Selain teknik aerasi, proses lain yang digunakan untuk mendapatkan mikrosfir UO_2 berdensitas rendah adalah proses pemanasan *broth*^[8] pada temperatur rendah sebelum digelasi atau dengan menambahkan *pore former*

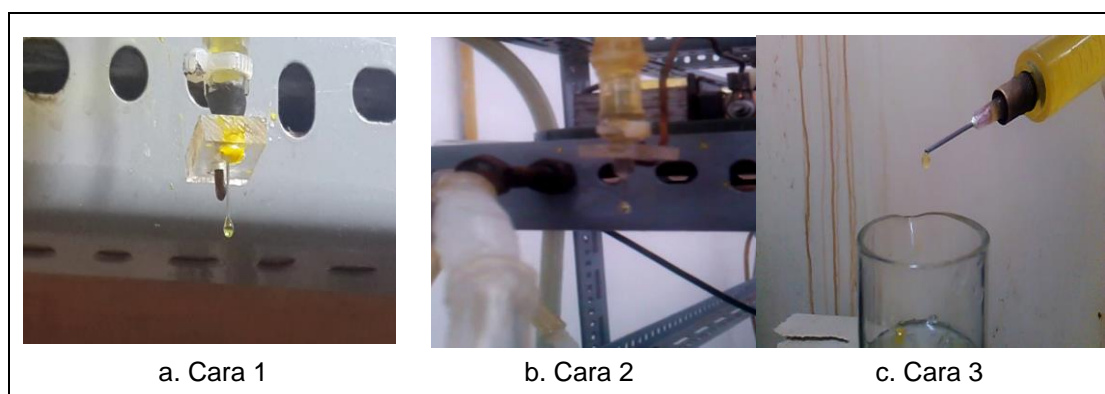
pada *broth*^[18]. Tahapan proses sol-gel yang lain yang dapat digunakan untuk mendapatkan mikrosfir UO_2 berdensitas rendah adalah proses perlakuan panas terhadap mikrosfir^[14,16-17].

Pada penelitian ini dilakukan fabrikasi mikrosfir UO_2 berdensitas rendah menggunakan teknik aerasi terhadap *broth* dengan memvariasikan cara penggelasian *broth*. Dengan menggunakan teknik aerasi diharapkan akan diperoleh mikrosfir UO_2 berdensitas rendah yang memenuhi kriteria sebagai umpan langsung proses peletisasi bahan bakar PWHR maju dan PWR maju.

METODOLOGI

Pembuatan mikrosfir UO_2 dimulai dengan proses penyiapan *broth*. *Broth* yang akan digelasi disiapkan dengan melarutkan serbuk U_3O_8 dalam HNO_3 dan ditambahkan NH_4OH untuk proses prenetralisasi sehingga diperoleh larutan ADUN (*Acid-deficient Uranyl Nitrate*)^[5-6,9-12,19]. Selanjutnya ditambahkan larutan polivinil alkohol (PVA) dan tetrahidrofurfuril alkohol (THFA) agar diperoleh *broth* dengan viskositas tertentu^[9-12,19].

Broth yang sudah disiapkan digelasi dengan teknik aerasi melalui tiga cara sebagaimana ditampilkan Gambar 1.



Gambar 1. Variasi Proses Penggelasian *Broth*.

Proses gelasi dengan cara 1 dan cara 2 dilakukan dengan melewati *broth* pada *dispersion nozzle* berdiameter 1mm

yang digetarkan dengan *electromagnetic vibrator* pada 150Hz^[19]. Pada proses gelasi cara 1, *droplet* yang keluar dari *nozzle* jatuh

bebas masuk ke kolom media udara dan langsung masuk ke dalam larutan NH_4OH . Pada proses gelasi cara 2, *droplet* yang keluar dari *nozzle* jatuh bebas masuk ke kolom media udara, dilanjutkan dengan media gas NH_3 dan masuk ke dalam larutan NH_4OH . Proses gelasi cara 3 dilakukan secara manual, dimana *droplet* yang keluar dari jarum berdiameter 1mm jatuh bebas masuk ke kolom media udara dan masuk ke dalam larutan NH_4OH . Gel atau mikrosfir UO_2 basah yang diperoleh dari ketiga cara di atas mendapat perlakuan panas yang sama yaitu dikeringkan pada temperatur 85°C dan 220°C masing-masing selama 1 jam, selanjutnya dilakukan proses kalsinasi mikrosfir UO_2 selama 1jam pada temperatur 500°C dalam media gas O_2 . Mikrosfir UO_2 hasil kalsinasi kemudian direduksi pada temperatur 600°C dalam media campuran gas N_2 dan H_2 selama 1jam^[19]. Mikrosfir UO_2 hasil proses reduksi disortir dan dikarakterisasi agar diperoleh data *tap density* dan luas muka spesifik^[19].

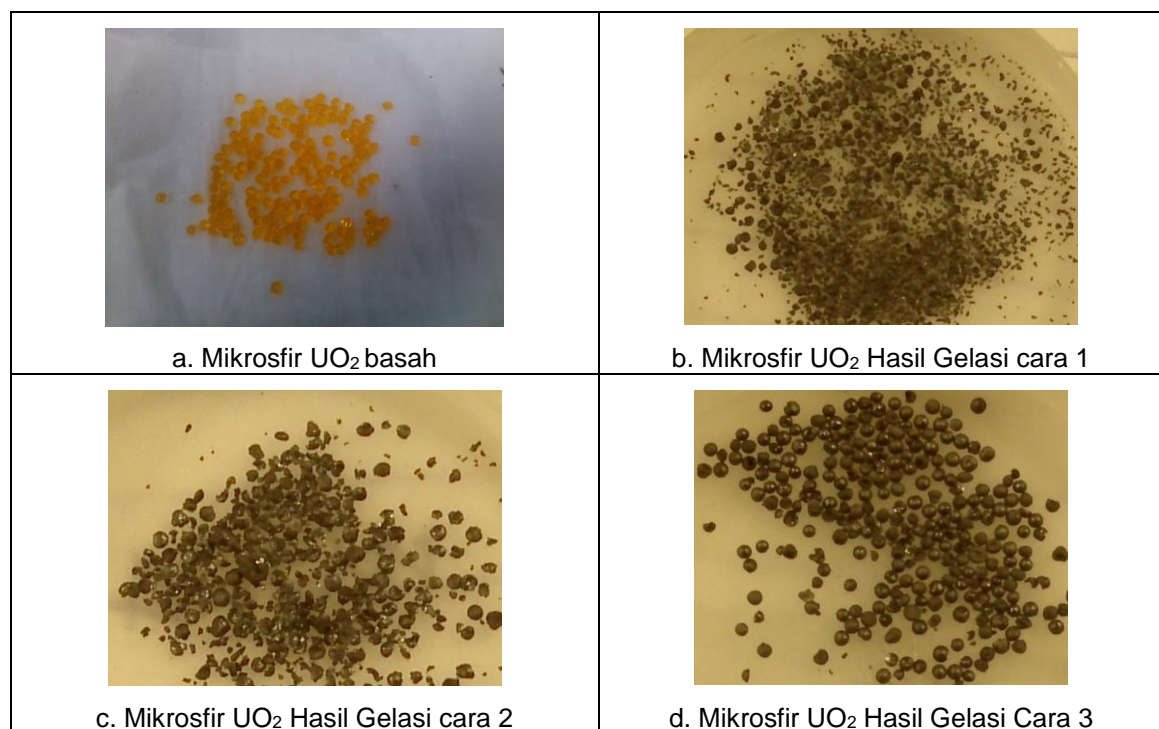
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pelarutan serbuk U_3O_8 dalam HNO_3 yang telah diprenetralisasi dan ditambahkan larutan polivinil alkohol (PVA) dan tetrahidrofurfuril alkohol (THFA) adalah *broth* dengan karakteristik seperti yang diperlihatkan pada tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik *Broth* untuk proses gelasi dengan teknik aerasi.

Karakteristik	<i>Broth</i> untuk gelasi dengan cara 1, 2 dan 3
Perbandingan mol NO_3^-/U	1,5 – 1,7
Viskositas (cP)	630 – 660
pH	1,6

Mikrosfir UO_2 hasil gelasi *broth* menggunakan teknik aerasi dengan tiga variasi cara gelasi diperlihatkan pada Gambar 2. Gambar 2 memperlihatkan kondisi mikrosfir UO_2 hasil proses kalsinasi-reduksi untuk ketiga variasi gelasi. Persentase mikrosfir UO_2 yang utuh pada variasi cara gelasi ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 2. Mikrosfir UO_2 hasil pencucian dan hasil proses kalsinasi-reduksi dengan teknik aerasi dan tiga variasi cara Gelasi.

Tabel 2. Mikrosfir UO_2 hasil proses kalsinasi-reduksi dengan variasi cara gelasi

Proses Gelasi	Prosentase mikrosfir UO_2 yang utuh (%)
Cara 1	10
Cara 2	25
Cara 3	70

Pada Gambar 2 dan Tabel 2 dapat dilihat bahwa jumlah mikrosfir yang utuh yang diperoleh dengan gelasi cara 3 lebih banyak dibanding proses gelasi cara 1 dan cara 2. Gambar 2 dan Tabel 2 memberikan gambaran mengenai pengaruh cara pengelasan terhadap kekuatan mikrosfir UO_2 yang dihasilkan menggunakan *broth* dengan karakteristik yang sama. Kekuatan mikrosfir UO_2 diwakili oleh prosentase mikrosfir UO_2 yang utuh. Kekuatan mikrosfir senyawa UO_2 dipengaruhi oleh laju proses dispersi (pembentukan droplet), media dan durasi droplet selama jatuh bebas sampai sebelum masuk ke larutan larutan NH_4OH ^[10]. Proses yang dimulai dari droplet yang keluar dari *nozzel* atau jarum sampai dengan sesaat sebelum masuk larutan NH_4OH merupakan proses pengerutan (*shrinkage*) permukaan mikrosfir dan pengerasan awal mikrosfir^[10]. Bila ditinjau dari sisi laju dispersi, jika membandingkan mikrosfir senyawa UO_2 yang diperoleh dari proses gelasi cara 1 dan cara 2, maka dapat dikatakan bahwa mikrosfir hasil gelasi cara 2 relatif lebih kuat dibandingkan dengan mikrosfir yang dihasilkan dengan cara 1. Dengan laju dispersi yang sama, mikrosfir cara 1 hanya mengalami proses pengerutan di udara, sementara mikrosfir dengan gelasi cara 2 mengalami dua proses yaitu proses pengerutan di media udara dilanjutkan dengan proses pengerasan awal oleh gas NH_3 . Jika ditinjau dari sisi durasi proses, dapat dikatakan bahwa mikrosfir hasil gelasi cara 3 mempunyai kekuatan lebih tinggi dibanding dengan yang dihasilkan cara 1. Pada proses gelasi tersebut, walaupun media untuk *droplet* jatuh bebas adalah sama yaitu udara, tetapi laju dispersi cara 3 lebih rendah dari gelasi cara 1. Dengan laju

dispersi yang rendah, *broth* yang keluar dari jarum mempunyai durasi lebih panjang untuk membentuk droplet hingga droplet yang terbentuk jatuh bebas ke media udara, jika dibandingkan dengan proses yang sama yang terjadi pada gelasi cara 1. Berdasarkan Gambar 2 dan data pada Tabel 2 serta analisis laju dispersi dengan durasi dari ketiga variasi cara gelasi, maka mikrosfir UO_2 hasil gelasi cara 3 mempunyai kekuatan yang paling tinggi diantara tiga cara gelasi tetapi dengan laju dispersi (pembentukan droplet) yang paling rendah. Mikrosfir UO_2 hasil gelasi cara 1 mempunyai kekuatan yang paling rendah tetapi laju dispersi /produksi droplet yang tinggi. Berdasarkan uraian di atas, maka dari ketiga cara gelasi dengan teknik aerasi, gelasi cara 2 mempunyai peluang yang paling besar untuk menghasilkan mikrosfir UO_2 dengan laju produksi yang tinggi dan kekuatan mikrosfir tertentu jika dilakukan pengaturan ulang pada laju dispersi dan durasi *droplet* jatuh bebas.

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa persentase mikrosfir UO_2 yang utuh yang paling tinggi dihasilkan melalui gelasi cara 3. Oleh karena itu, dipilih mikrosfir UO_2 hasil gelasi cara 3 untuk disortir dan dikarakterisasi lebih lanjut. Data karakteristik mikrosfir senyawa UO_2 hasil penyortiran ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil karakterisasi mikrosfir UO_2 dengan proses gelasi cara 3

Ukuran Mikrosfir UO_2 rata-rata	900 μm
<i>Tap density</i>	1,90 g/cm^3
Luas muka spesifik	6 m^2/g

Kualitas mikrosfir UO_2 yang diperoleh dari fabrikasi dianalisis dengan menggunakan teknik aerasi dengan gelasi cara 3, dilakukan perbandingan karakteristiknya dengan karakteristik mikrosfir UO_2 hasil penelitian lain yang menggunakan perlakuan yang berbeda terhadap *broth*. Hasil perbandingan karakteristik mikrosfir tersebut ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristik mikrosfir UO_2 dengan variasi perlakuan terhadap broth

No.	Perlakuan Terhadap Broth	Tap density (g/cm ³)	Luas muka spesifik (m ² /g)
1.	Penggelasian <i>broth</i> dengan teknik aerasi cara 3	1.90	6
2.	Pemanasan <i>broth</i> sebelum penggelasian ^[6]	1,08 - 1,2	-
3.	Penambahan <i>pore former</i> pada <i>broth</i> ^[14]	-	5 - 15

Pada Tabel 4, mikrosfir UO_2 yang diperoleh dengan teknik aerasi dan penggelasian *broth* cara 3 mempunyai *tap density* sebesar 1,90 g/cm³. Bila dibandingkan dengan data *tap density* hasil penelitian Collins^[8] yang melakukan pemanasan *broth* pada temperatur rendah, dapat dikatakan bahwa mikrosfir UO_2 yang diperoleh dengan teknik aerasi termasuk dalam kelompok mikrosfir UO_2 berdensitas rendah^[8]. Demikian juga bila dibandingkan dengan data luas muka spesifik mikrosfir hasil penelitian Ganguly^[18], luas muka mikrosfir dengan teknik aerasi ini berada di batas bawah mikrosfir penelitian Ganguly. Dengan penambahan *carbon black* pada *broth* sebagai *pore former* maka karbon dalam mikrosfir dapat keluar dengan sempurna, Ganguly melakukan proses kalsinasi mikrosfir dengan laju pemanasan yang rendah^[14]. Proses kalsinasi ini memakan waktu yang lama sehingga proses fabrikasi mikrosfir UO_2 berdensitas rendah yang dilakukan Ganguly menjadi tidak ekonomis^[14]. Sementara itu, dengan menggunakan teknik aerasi, proses kalsinasi yang dilakukan hanya dalam durasi 1 jam untuk memperoleh mikrosfir UO_2 berdensitas rendah.

Selain variasi perlakuan terhadap *broth*, tahapan proses sol-gel yang lain yang

dapat digunakan untuk mendapatkan mikrosfir UO_2 berdensitas rendah adalah proses perlakuan panas^[14,16-17] terhadap mikrosfir. Pengaruh penggunaan teknik aerasi dengan gelasi cara 3 yang dilanjutkan dengan perlakuan panas tertentu terhadap karakteristik mikrosfir UO_2 ditampilkan pada Tabel 5. Pada Tabel tersebut diberikan pula karakteristik mikrosfir UO_2 hasil penelitian yang dilakukan Kumar^[14] dan Kutty^[16] sebagai pembanding.

Sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 5, mikrosfir UO_2 yang diperoleh dari penggunaan teknik aerasi dengan gelasi cara 3 mempunyai *tap density* 1,90 g/cm³ dan luas muka spesifik setelah mendapat perlakuan panas diperoleh sebesar 6 m²/g. Mikrosfir UO_2 yang difabrikasi melalui teknik aerasi ini mempunyai *tap density* lebih tinggi dan luas muka spesifik yang lebih rendah bila dibandingkan dengan hasil penelitian Kumar^[14] dan Kutty^[16] yang menggunakan parameter proses kalsinasi-reduksi yang hampir sama. Bila *tap density* dan luas muka spesifik dianggap sebagai indikator tingkat keporusan mikrosfir maka mikrosfir UO_2 hasil fabrikasi melalui teknik aerasi merupakan mikrosfir dengan tingkat keporusan paling rendah diantara mikrosfir dari tiga penelitian yang berbeda seperti yang ditampilkan Tabel 5.

Tabel 5. Karakteristik mikrosfir UO_2 dengan variasi perlakuan panas

Proses; \varnothing_m (μm)	Perlakuan panas		Karakteristik mikrosfir UO_2		Hasil peletisasi mikrosfir UO_2	
	T_k , Atm, t ($^{\circ}\text{C}$, jam)	T_r , Atm, t ($^{\circ}\text{C}$, jam)	ρ_t (g/cm^3)	ρ_{sp} (m^2/g)	ρ_g (%TD)	ρ_s (%TD)
Teknik aerasi Gelasi cara 3; 900	500 $^{\circ}\text{C}$ (O_2 , 1 jam)	600 $^{\circ}\text{C}$ (H_2+N_2 , 1 jam)	1,90	6,0	84,2 ^[16]	87,8 ^[16] (1100 $^{\circ}\text{C}$, 6 jam)
Kumar ^[14] ; 1100	600 $^{\circ}\text{C}$ (udara, 1 jam)	600 $^{\circ}\text{C}$ (8% H_2 +92% N_2 , 1 jam)	1,43	8,3	47,4	94-95 (1600 $^{\circ}\text{C}$, 2 jam)
Kutty ^[16] ; 930	600 $^{\circ}\text{C}$ (udara, 1 jam)	600 $^{\circ}\text{C}$ (Ar+8% H_2 , 2 jam)	1,62	6,8	50,3- 54,8	91 \pm 0,4 (1600 $^{\circ}\text{C}$, 4 jam)

Keterangan:

\varnothing_m = Diameter mikrosfir ; T_k =Temperatur kalsinasi ; T_r =Temperatur reduksi ;

Atm= media gas ; t=durasi ; ρ_t = tap density ; ρ_{sp} =luas muka spesifik;

ρ_g =densitas pelet mentah ; ρ_s =densitas pelet sinter

Pengaruh teknik aerasi terhadap sifat mampu kompak dan mampu sinter mikrosfir UO_2 telah dianalisis melalui proses peletisasi mikrosfir UO_2 ^[20]. Hasil proses peletisasi mikrosfir UO_2 dengan teknik aerasi seperti yang ditunjukkan Tabel 5 adalah sebesar 84,2%TD untuk densitas hasil kompaksi dan 87,8%TD untuk densitas pelet sinter. Jika dibandingkan dengan hasil kompaksi mikrosfir UO_2 milik Kumar^[14] dan Kutty^[16], ternyata mikrosfir UO_2 dengan teknik aerasi memberikan pelet mentah dengan densitas yang lebih tinggi walaupun pada ketiga penelitian menggunakan tekanan kompaksi yang hampir sama. Hal ini membuktikan bahwa mikrosfir UO_2 dengan teknik aerasi bersifat *free-flowing* dengan mampu kompak yang tinggi^[20]. Untuk proses penyinteran, pelet sinter mikrosfir UO_2 dengan teknik aerasi mempunyai densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil penyinteran Kumar^[14] dan Kutty^[16]. Hal ini dimungkinkan karena penggunaan temperatur penyinteran mikrosfir teknik aerasi yang lebih rendah, walaupun durasinya lebih panjang. Data ini memperlihatkan bahwa pelet mikrosfir UO_2 dengan teknik aerasi berpeluang untuk mempunyai densitas pelet sinter yang lebih tinggi bila menggunakan parameter

penyinteran yang sama dengan yang digunakan oleh Kumar^[14] dan Kutty^[16]. Berdasarkan fakta di atas dapat dikatakan bahwa mikrosfir UO_2 hasil fabrikasi dengan teknik aerasi merupakan mikrosfir UO_2 berdensitas rendah dengan mampu kompak dan mampu sinter yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai umpan langsung proses peletisasi bahan bakar PHWR maju.

SIMPULAN

Penggunaan teknik aerasi pada *broth* menghasilkan mikrosfir UO_2 berdensitas rendah yang memenuhi kriteria sebagai umpan langsung proses peletisasi bahan bakar PHWR maju dan PWR maju. Berdasarkan analisis menunjukkan bahwa proses gelasi cara 2 mempunyai peluang yang paling besar untuk menghasilkan mikrosfir UO_2 dengan laju produksi yang tinggi dan karakteristik tertentu jika dilakukan pengaturan ulang pada laju dispersi dan durasi *droplet* jatuh bebas. *Future work* dari penelitian ini adalah penerapan fabrikasi mikrosfir UO_2 dengan teknik aerasi pada proses fabrikasi mikrosfir bahan bakar MOX (*Mixed OXide*) atau CerMet dengan melakukan beberapa penyesuaian pada parameter proses sol-gel dan proses perlakuan panasnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ka. PTBBN – BATAN dan seluruh staf yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zinkle, S.J. et al (2014). *Accident Tolerant Fuels for LWRs: A Perspective*. Journal of Nuclear Materials 448, page 374 – 379.
- [2] Bogusch, E and Hittner, D. (2009). *Programmes and Projects for High Temperature Development*. Kernkraftwerke: Hochtemperaturreaktoren, atw 54. Jg. Heft 2 – Februar, page 84 – 88.
- [3] INL (2010). NGNP Fuel Qualification White Paper. INL/EXT-10-18610. INL-NGNP Project, US-DOE.
- [4] Beck, J.M. and Pincock, L.F. (2011). *High Temperature Gas-cooled Reactors Lessons Learned Applicable to The Next Generation Nuclear Plant*. INL/EXT-10-19329 Rev 1, INL-NGNP Project, US-DOE.
- [5] Hunt, R.D. et al (2014). *Recommended Dispersing Conditions for Broths Used in The Preparation of Uranium Microspheres with Carbon*. Annals of Nuclear Energy 71, page 1-5.
- [6] Hunt, R.D. et al (2010). *Treatment Techniques to Prevent Cracking of Amorphous Microspheres Made by The Internal Gelation Process*. Journal of Nuclear Material 405, page 160 – 164.
- [7] Hunt, R.D. et al (2012). *Preparation of Uranium Fuel Kernels with Silicon Carbide Nanoparticles Using The Internal Gelation Process*. Journal of Nuclear Material 427, page 245 – 248.
- [8] Collins, J.L., et al (2004). *Production of Depleted UO_2 Kernels for The Advanced Gas Cooled Reactor Program for Use in Triso Coating Development*. ORNL/TM-2004/123, US DOE.
- [9] Heyduk, J. (2015). *BATAN Work Instruction Kernel Preparation*. DNR 146679-0, NUKEM TECHNOLOGIES.
- [10] Hao, S. et al (2014). *Large Scale Production of UO_2 by Sol-Gel Process at INET*. Nuclear Engineering and Design 271, page 158 – 161
- [11] Xiangwen, Z. et al (2012). *Preparation of Ammonium Diuranate Particles by External Gelation Process of Uranium in INET*. Nuclear Engineering and Design, 250, page 192-196.
- [12] Takahashi, M. (2009). *Method of Preparing Feedstock Liquid, Method of Preparing Uranyl Nitrate Solution, and Method for Preparing Polyvinyl Alcohol Solution*. Patent, Nuclear Fuel Industries Ltd., Tokyo.
- [13] Sokucu, A.S. et al (2014). *Study on Preparation and First-Stage Sintering Kinetics of ThO_2 - UO_2 Pellets Made by Sol-Gel Microsphere Technique*. Acta Physica Polonica A, Vol. 127, No.4, page 987 – 991.
- [14] Kumar, N. et al (2006). *Preparation of (U, Pu) O_2 Pellets Through Sol-Gel Microspheres Pelletization Technique*. Journal of Nuclear Material 359, page 69 – 79.
- [15] Schreinemachers, C. et al (2014). *Characterization of Uranium Neodymium Oxide Microspheres Synthesized by Internal Gelation*. Progress in Nuclear Energy, 72, page 17-21.
- [16] Kutty, P.S. et al (2013). *Fabrication of Dense $(\text{Th}_{0.96}\text{U}_{0.04})\text{O}_2$ by Sol Gel Microsphere Pelletisation (SGMP) Route*. BARC/2013/E/001, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai.
- [17] Remy, E. et al (2012). *Calcined Resin Microsphere Pelletization (CRMP): A Novel Process for Sintered Metallic Oxide Pellets*. Journal of the European Ceramic Society, 32, page 3199 – 3209.
- [18] Ganguly, C. (2001). *Ceramic Nuclear Fuels for Power Reactors*. PINSA, 67, A, Nos 4&5, 531-574, India.

-
- [19] Meniek, R. et al (2013). *Research on Sol-gel Microsphere Pelletization of UO_2 for PHWR Fuel in Indonesia*. IAEA Tecdoc CD 1751.
- [20]. Mutiara, E. dkk. (2016). Perbandingan Densitas Pelet UO_2 Hasil Peletisasi Menggunakan Serbuk dan Mikrosfir. Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania, Vol.22.No.1. Februari 2016. ISSN No. 0852-4777, Akreditasi No 595/AU3/ P2MI-LIPI/ 03/2015.
- [21] Pai, R.V. et al (2008). *Fabrication of Dense (Th,U) O_2 Pellets Through Microspheres Impregnation Technique*. Journal of Nuclear Material 381, page 249 – 258.
- [22]. Daniels, H. et al (2012). *Fabrication of Oxidic Uranium-Neodyum Microspheres by Internal Gelation*. Progress in Nuclear Energy 57, 106-110.
- [23]. Ferreira, R.A.N. et al (2006). A Model for The Behavior of Thorium Uranium Mixed Oxide Kernels in The Pelletizing Process. Journal of Nuclear Material 350, page 271–283.